



适用于 60 GHz 脉冲通信系统的 Rake 均衡接收方案

陈现, 李学华

(北京信息科技大学信息与通信工程学院, 北京 100101)

摘要: 60 GHz 脉冲通信环境中的多径衰落问题使信号能量发生弥散并产生符号间干扰 (ISI)。针对这一问题, 分析了系统中 ISI 的严重程度, 并研究了消除干扰的解决方法。在 IEEE 802.15.3c 工作组建立的 60 GHz 无线信道模型基础上, 搭建了 60 GHz 脉冲通信系统仿真平台, 对系统中的 ISI 进行了理论分析与数值仿真, 设计了一种 Rake 接收机联合均衡器的接收方案。研究表明, 采用两径 MRC-Rake 接收模块并联合 MMSE 线性均衡模块, 既可获得多径分集增益又能有效处理 ISI, 在不增加过多复杂度的同时提高了系统性能。为今后 60 GHz 脉冲通信系统接收方案的设计提供了技术参考。

关键词: 60 GHz; 5G; 符号间干扰; 均衡器; Rake 接收机

中图分类号: TN914

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016011

Receiver scheme of rake equalization for 60 GHz pulse communication system

CHEN Xian, LI Xuehua

School of Information and Telecommunication Engineering, Beijing Information
Science and Technology University, Beijing 100101, China

Abstract: Dispersion of the signal energy and the inter symbol interference (ISI) is caused by the multipath fading in 60 GHz pulse communication environment. To solve this problem, the severity of the ISI in the system was analyzed, and the method to eliminate interference was studied. Based on the 60 GHz wireless channel model established by IEEE 802.15.3c, the simulation platform of 60 GHz pulse communication system was built. Theoretical analysis and numerical simulation of ISI in the system were carried out, and a receiver scheme of combining Rake receiver and equalizer was designed. Results show that, the two taps MRC-Rake receiver module combined with MMSE linear equalization module can not only improve the signal energy by multipath diversity, but also eliminate ISI. The performance of the system was improved without increasing the complexity. The scheme provides a reference for the design of 60 GHz pulse communication system in the future.

Key words: 60 GHz, 5G, inter symbol interference, equalizer, Rake receiver

收稿日期: 2015-07-20; 修回日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61171039); 北京市青年拔尖人才资助项目 (No. CIT&TCD201404114); 北京市教委科技面上项目 (No. KM201511232010)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 61171039), Beijing Youth Talents Foundation of Beijing (No. CIT&TCD201404114), Science and Technology Project of Beijing Municipal Education Commission (No. KM201511232010)

1 引言

数字多媒体技术的不断发展,促使人们对无线传输的速率需求不断增加,视频、音频等应用的不断发展在大大提高用户体验的同时,对无线传输技术也提出了更高的要求。60 GHz 毫米波技术因其带宽大、速率高、适合短距离传输等优势成为研究趋势。在 60 GHz 频段上,氧气吸收效应明显,无线传输衰减高达 15 dB/km,这使得 60 GHz 空间隔离度很高且传输安全性很好,并且 60 GHz 频段巨大的免授权带宽资源可支持 Gbit/s 的数据速率^[1]。在 60 GHz 频带上运行的 WiGig(wireless gigabit,无线吉比特)技术,不仅能满足高分辨率视频信号、大文件的传输需求,而且 HDMI、Display Port、PCIe 和 USB 等都可以适配到 WiGig MAC 层进行传输,这吸引了学术界以及工业界极大的兴趣^[2-4]。第五代(5G)移动通信将在室内外局部热点区域为用户提供数十 Gbit/s 的峰值速率,60 GHz 频段被列为重点候选频段^[5]。随着 60 GHz 无线通信技术应用需求的不断增加,半导体加工工艺的不断进步,制造小体积、低成本、高性能的 60 GHz 芯片也逐渐成为可能^[6]。因此,60 GHz 高速无线通信的研究已经成为未来无线技术领域的研究热点。

现有 60 GHz 通信系统物理层方案大多采用载波通信进行传输,而载波通信系统具有硬件结构复杂、功耗高、对信道中的多径衰落敏感等缺点,因此在 60 GHz 无线通信系统中采用载波通信将使整个系统的复杂度和成本大大提高。60 GHz 脉冲通信系统通过将脉冲通信技术应用在 60 GHz 频段,既提高了 UWB(ultra wideband)系统的通信容量和传输速率,又最大限度地降低了功耗并节约了成本^[7]。参考文献[8]设计实现了一种 60 GHz 超宽带脉冲发射机,脉冲周期只有 100 ps,证明了在 60 GHz 频段以脉冲信号为载体进行通信是可实现的。在 60 GHz 通信环境中多径效应明显^[9],参考文献[10]研究了 60 GHz 脉冲通信系统的接收方案,提出采用两径的 Rake 接收机能够有效解决系统中的多径衰落问题。然而,针对 60 GHz 多径效应问题的研究均集中在多径衰落引起的能量弥散上,没有考虑符号间干扰(inter symbol interference, ISI)对系统的影响。研究表明,在 60 GHz 多径环境下进行超过 Gbit/s 的超高速传输将产生严重的 ISI。因此针对这一问题,研究一种对抗系统多径衰落并消除符号间干扰的接收方案,以满足 60 GHz 脉冲通信系统高速、可靠的传输要求是十分必要的。

本文搭建了 60 GHz 脉冲通信系统仿真平台,对 60 GHz 脉冲通信系统中符号间干扰问题进行了理论分析与数值仿真,设计了一种 Rake 接收机联合均衡器的接收方案,通过仿真分析了接收方案中均衡抽头数、均衡算法以及 Rake 合并方式对系统性能的影响。研究表明,采用两径 MRC-Rake 接收模块并联合 MMSE 线性均衡模块的接收方案能够在不增加过多复杂度的同时提高系统性能。

2 60 GHz 无线信道模型分析

本文的研究基于传输距离在数米内的 60 GHz 脉冲通信环境,根据 IEEE 802.15.3c 工作组建立 60 GHz 无线信道模型,该模型中的 CM7.1 适用于通信距离 5 m 以内的短距离通信系统,因此采用 CM7.1 作为系统的信道模型。信道冲激响应反映了信道的多径衰落特性,均方根时延影响着系统中 ISI 的严重程度,因此本节将对 CM7.1 信道的一个样本中的这两个参数进行分析。

60 GHz 频段的路径损耗模型为:

$$PL(d)=20\lg\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)+10n\lg\left(\frac{d}{d_0}\right)+X_\sigma \quad (1)$$

其中,前两项表示平均路径损耗, d_0 是参考距离, n 为路径损耗系数,取决于信道环境,本文 $n=1.95^{[11]}$, X_σ 表示阴影衰落。

2.1 信道离散冲激响应

根据 Saleh-Valenzuela 模型在角度域的扩展得到了方向信道冲击响应的复数基带表达式:

$$h(\tau,\phi)=\alpha_{LOS}\delta(\tau,\phi)+\sum_{l=0}^L\sum_{k=0}^K\alpha_{k,l}\delta(\tau-T_l-\tau_{k,l})\delta(\phi-\theta_l-\omega_{k,l}) \quad (2)$$

其中, δ 是狄拉克冲激函数, $\alpha_{LOS}\delta(\tau,\phi)$ 为直达径分量, L 是簇的数目, K 是多径分量数目, $\alpha_{k,l}$ 、 $\tau_{k,l}$ 和 $\omega_{k,l}$ 分别是每个多径分量的复数幅度、时延和到达方位角, T_l 和 θ_l 是每簇的时延和平均到达方位角。图 1 是传输距离为 3 m,60 GHz CM7.1 信道冲激响应的一个样本。

2.2 均方根时延

在多径信道传播条件下,发射信号经过多条路径到达接收天线的时间不同,因此在接收端将发生时延扩展。如图 2 所示,在 CM7.1 信道下,均方根时延扩展平均值为 1.756 ns,最大值为 7.5 ns。在 60 GHz 脉冲通信系统中数据速率应超过 1 Gbit/s,即符号周期最大值为 1 ns,这远小于均方根时延扩展的平均值,因此系统中的 ISI 很严重,这就需要对接收系统进行均衡处理。

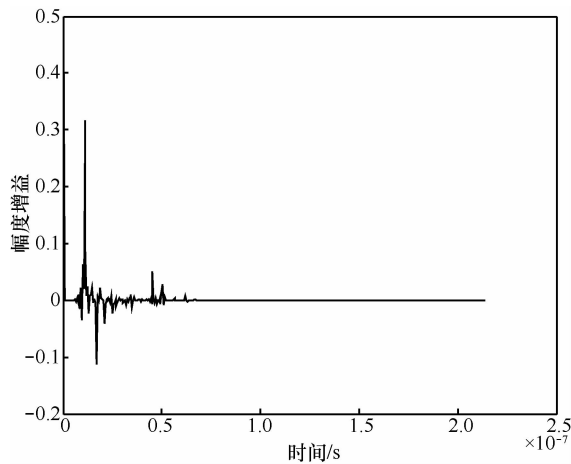


图1 CM7.1信道离散冲激响应

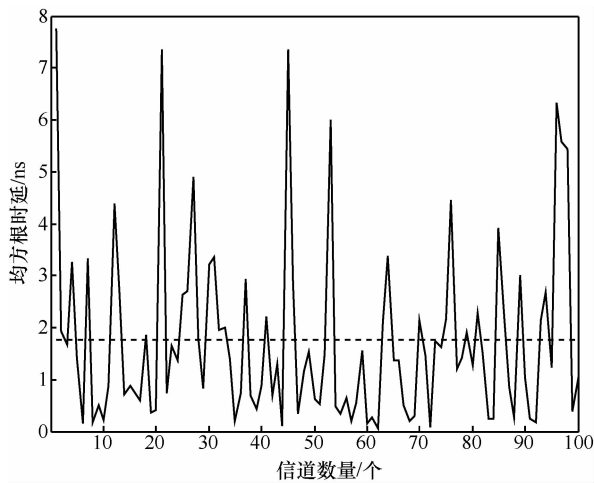


图2 均方根时延

3 系统模型与干扰分析

本节建立 60 GHz 脉冲通信系统模型,调制方式选择直扩脉冲幅度调制 (DS-PAM),信道选用 IEEE 802.15.3c 标准中的 CM7.1 信道模型,接收机采用结构简单的相干接收,如图 3 所示。

本节着重分析系统模型下 ISI 的数学特征,为突出研究重点,假设收发信机完全同步,不存在用户间干扰,天线传输特性理想。系统采用载波搬移高斯脉冲至 60 GHz 频段的方法生成脉冲波形。

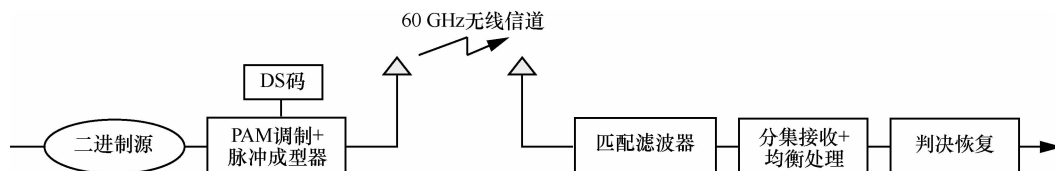


图3 60 GHz 脉冲通信系统

$$p(t) = -e^{-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}} \cos(2\pi f_c t), t \in [0, T_p] \quad (3)$$

其中, α 是脉冲因子, T_p 为脉冲持续时间, f_c 为中心频率, 对于 60 GHz 通信系统, 一般取 $f_c = 60.5$ GHz。发射机发送的 PAM 信号表达式为:

$$s(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} b_j p(t - jT_s) \quad (4)$$

其中, T_s 为脉冲重复周期, b_j 表示第 j 个符号经过 PAM 调制、DS 编码映射后的二进制数据序列。

在 60 GHz 脉冲通信系统中, 通常在若干信号时间内可视作准静态信道, 对于分辨率为 Δ 的多径信道, 可用有限冲激响应滤波器表示:

$$h(t) = \sum_{i=0}^{L-1} \gamma_i \delta(t - i\Delta) \quad (5)$$

其中, $\gamma_i (i=0, \dots, L-1)$ 表示路径幅度衰落, L 表示路径数量, $\tau_{\max} = L\Delta$ 为多径信道最大时延扩展。

经过多径信道传播后, 接收信号为:

$$r(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} b_j \sum_{i=0}^{L-1} \gamma_i p(t - jT_s - i\Delta) + n(t) \quad (6)$$

假设解调第 j_0 个周期脉冲的相干掩膜为:

$$v(t, j_0) = b_{j_0} p(t - j_0 T_s) \quad (7)$$

接收机的判决输出为:

$$\begin{aligned} Z &= \int_{j_0 T_s}^{(j_0+1)T_s} r(t) v(t) dt \\ &= \int_{j_0 T_s}^{(j_0+1)T_s} \left\{ \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{i=0}^{L-1} b_j \gamma_i p(t - jT_s - i\Delta) b_{j_0} p(t - j_0 T_s) + b_{j_0} p(t - j_0 T_s) n(t) \right\} dt \\ &= Z_u + Z_n + Z_{isi} \end{aligned} \quad (8)$$

由 (8) 式可得, 判决输出主要分为 3 个部分: 有用信号部分 Z_u 、白噪声部分 Z_n 以及干扰部分 Z_{isi} 。

设 $\lambda_q^{(i)}$ 为第 q 个脉冲带来的第 i 路多径分量, $\gamma(\lambda_q^{(i)})$ 为相应的幅度衰落因子, $R_p(\tau)$ 为脉冲波形的自相关函数, 第 j_0 个周期内脉冲受到的 ISI 可表示为:

$$Z_{isi}(j_0) = \sum_{q=-\infty}^{j_0-1} b_{j_0} \sum_{i=0}^{L-1} \gamma(\lambda_q^{(i)}) R_p((j_0 - q)T_s - \lambda_q^{(i)}) \quad (9)$$

令 $k = j_0 - q$, 根据应用环境的信道参数, 设每个脉冲的能

量为1,且忽略脉冲波形对能量损耗的影响,可以估算出ISI的平均功率为:

$$\sigma_{\text{ISI}}^2[E(Z_{\text{ISI}})^2] = \frac{\bar{L}}{L} E \left[\sum_{k=1}^{+\infty} (\gamma(kT_s))^2 \right] \quad (10)$$

其中, $\bar{L}$ 为一个脉冲引起的多径分量的平均数,所以多径分量的出现概率近似为 $\bar{L}/L$ 。

Rake接收机可以将分散的能量收集起来,提高系统效率:发射机发送信号 $s(t)$,通过CM7.1信道后,接收机接收到的信号为 $r(t)$, $r(t)$ 经过多径分离分为多路信号,并对每路信号进行相关接收,最后合并得到的输出 Z 为:

$$Z = \sum_{i=0}^{L-1} \omega_i \int r(t)v(t)dt = \sum_{j=1}^{\infty} b_j \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i \omega_i \int p(t-jT_s-\tau_i)v(t-\tau_i)dt + n(t) \quad (11)$$

其中, ω_i 为加权因子,由合并方案决定。常用的合并方案有等增益合并(EGC)、最大比合并(MRC)和最小均方误差合并(MMSE)。将信号通过均衡器,可以得到:

$$Z_p(k) = \sum_{n=-l}^{n=l} c_n Z_{\text{ISI}}(k-n) \quad (12)$$

其中, c_n 为均衡器的抽头系数,信号经过均衡后的ISI的平均功率为:

$$\sigma_p^2 = \frac{\bar{L}}{L} E \left[\sum_{k=1}^{+\infty} c_n (\gamma(kT_s))^2 \right] \quad (13)$$

因此,系统的信噪比可以表示为:

$$\text{SNR} = \frac{\sigma_u^2}{\sigma_p^2 + \sigma_n^2} = \frac{E_b \sum_{i=0}^{L-1} \gamma_i^2 \omega_i^2}{\frac{\bar{L}}{L} E \left[\sum_{k=1}^{+\infty} c_n (\gamma(kT_s))^2 \right] + \sigma_n^2} \quad (14)$$

2PAM调制方式在高斯白噪声信道下的误码率为 $P=Q[\sqrt{2\text{SNR}}]$,假设信道幅度衰落的概率密度函数为 $f(\alpha_i)$,得到多径衰落信道下系统的误码率为:

$$P_e = \int \cdots \int P_f(\alpha_0 \cdots \alpha_{L-1}) d\alpha_0 \cdots d\alpha_{L-1} \quad (15)$$

4 Rake均衡联合接收方案设计与仿真

在60 GHz脉冲通信系统环境下,多径效应引起的符号间干扰使得高速通信难以实现,如果不对ISI加以有效处理,会造成错误判决,这将严重影响系统的误码性能。根据式(13)可知,ISI同时受到信道状况和脉冲周期的影响。选取不同脉冲周期对系统进行仿真。仿真参数设置如下:发射功率为0 dBm,采样频率为 1×10^{12} Hz,脉冲持续时间

为 2×10^{-11} s,脉冲形成因子为 8×10^{-12} 。

如图4可知,脉冲周期的不断减小使干扰越来越严重,当 T_s 减小到0.5 ns时,也就是传输速率达到2 Gbit/s时,系统干扰随着信噪比的增加越来越明显。当 T_s 减小到0.1 ns时,系统性能很差,将无法进行通信。

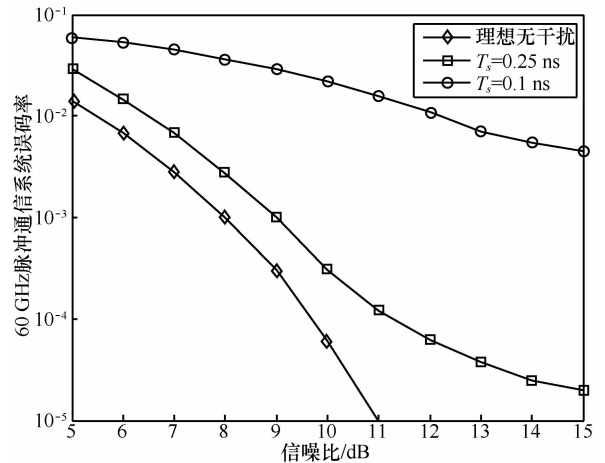


图4 脉冲周期对系统性能的影响

参考文献[12]指出,采用MMSE-Rake接收机可以对干扰与收集能量进行权衡,将各个支路的多径分量根据MMSE最小均方误差准则计算得到Rake接收机的合并系数,可以较好地提高系统性能。合并系数计算结果为:

$$\begin{pmatrix} c_0 \\ \vdots \\ c_L \end{pmatrix} = (Y Y^H)^{-1} (Y b^H) \quad (16)$$

由式(16)可以看到,采用MMSE算法得到的最优权值需要对矩阵的逆进行求解,但参考文献[12]采用UWB系统,传输速率较低,因此ISI不会扩展到过多的符号周期,而在60 GHz脉冲通信系统下,脉冲周期很小,即使主要干扰延伸到10 ns,也将需要几十条支路通过矩阵计算进行加权,系统将过于复杂,不利于硬件的实现。

参考文献[10]在CM7信道环境下仿真分析了多径分量的衰落特性,证明了其能量主要集中在前两径,并指出采用抽头数为2的Rake接收机可在不增加过多复杂度的情况下,收集到大部分能量。因此,本文在60 GHz脉冲通信系统中采用两支路的MRC-Rake接收机,并在后端联合时域均衡器的接收方案,既不需要大量Rake支路,又能够有效消除干扰。

Rake均衡接收方案的系统如图5所示,信号经历多径后首先通过Rake接收机将主要能量合并收集,得到信

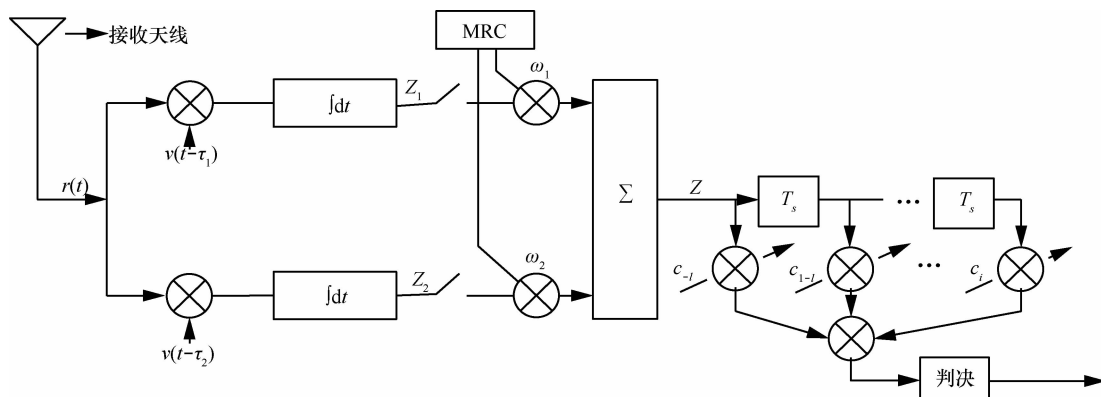


图5 Rake 均衡接收方案系统

号 Z , 合并方式采用最大比合并, 再将信号 Z 通过均衡器。

图6中 K 表示均衡器抽头数, L 表示 Rake 接收支路数。从图6可知, Rake 接收机能够捕捉到更多的信号能量, 提高系统性能。采用 Rake 均衡联合接收方案后, 系统性能得到大幅提高, 尤其是在信噪比较大的情况下, ISI 对系统的影响成为主导, 使均衡器的效果更加明显。均衡抽头数越多, 均衡效果越好, 当均衡器能够对最大时延的主要干扰进行处理时, 增加均衡抽头数对系统性能影响不大。

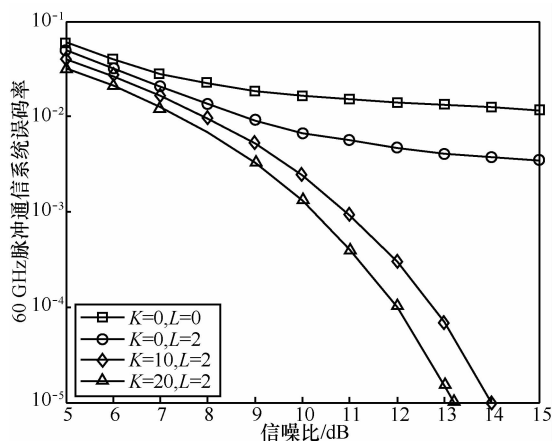


图6 Rake 均衡联合接收性能比较

采用不同的均衡结构以及均衡准则进行性能比较, 从图7可知, MMSE 线性均衡既能够有效处理 ISI, 同时又不增加过多复杂度, 对比其他均衡算法, MMSE 效果较好。

虽然采用 Rake 接收, 在 60 GHz 信道传输环境下实现了分集接收, 改善了多径衰落, 但其未考虑多径干扰对系统的影响, 不能满足高速通信的需求; 在 UWB 传输环境下采用 MMSE-Rake 接收方案, 可改善多径干扰对系统的影响, 但在 60 GHz 无线通信系统中采用 MMSE-Rake 接收,

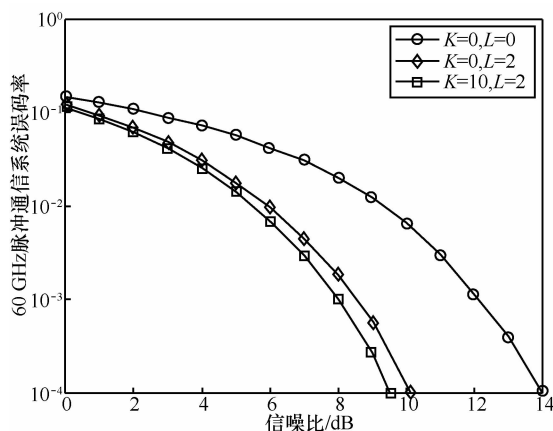


图7 均衡算法对系统性能的影响

需要进行复杂的高阶矩阵逆运算, 大大增加硬件的实现难度。本文基于 60 GHz 无线脉冲传输方案, 设计采用两支路、最大比合并的 Rake 接收机联合线性均衡器克服了上述缺点。

5 结束语

针对 60 GHz 通信环境中的多径干扰问题, 本文首先分析适用于该通信环境的信道模型, 根据通信距离、运行频段以及应用场景采用 IEEE 802.15.3c 工作组建立的 CM7.1 60 GHz 无线信道模型; 其次对 60 GHz 脉冲通信系统中 ISI 问题进行了理论分析与数值仿真, 得到信道状况和脉冲周期是 ISI 的主要影响因素; 最后设计了一种 Rake 接收机联合均衡器的接收方案以对抗 ISI, 并仿真分析了该方案中均衡抽头数、均衡算法以及 Rake 合并方式对系统性能的影响。结果表明, 采用两径 MRC-Rake 接收模块联合 MMSE 线性均衡模块的接收方案, 能够在不增加过多复杂度的同时提高系统性能。本文设计的接收方案在一定程度上解决了 60 GHz 脉冲通信系统中的多径干扰问

题,为今后 60 GHz 脉冲通信系统接收方案的设计提供了技术参考。

参考文献:

- [1] 方箭,王坦,黄标. 高频段宽带无线通信前瞻[J]. 电信科学, 2014, 30(3): 109-113.
FANG J, WANG T, HUANG B. Outlook of broadband wireless communications at high frequency bands[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(3): 109-113.
- [2] HANSEN C J. WiGiG: multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(6): 6-7.
- [3] MOPIDEVI H, HUNERLI H V, CAGATAY E, et al. Three-dimensional microfabricated broadband patch antenna for WiGig applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13(1): 828-831.
- [4] SAI S N, DASH D, MADI H E, et al. WiGig and IEEE 802.11ad for multi-gigabyte-per-second WPAN and WLAN[J]. ZTE Communications, 2012(4): 13-22.
- [5] IMT-2020 (5G) Promotion Group. The white paper on 5G wireless technology architecture [R/OL]. (2015-05-01)[2015-06-02]. http://wenku.baidu.com/link_url=HTDV6u2JsUr_7oJYD43_H70ZZeTvpxKfdE-e690YCq4ox_FBBrPOJtXV7WFFrVudYU68uidnXGbOOiTruxahVKTTfUuonocBB7cZckz4HCxq.
- [6] 李娜. 60 GHz 脉冲无线通信系统的性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
LI N. Performance analysis of 60 GHz impulse radio system[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [7] 李学华, 申思雨. 卷积码在 60 GHz 芯片间无线互连系统中的性能分析[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 2015111.
LI X H, SHEN S Y. Performance of convolution codes based on 60 GHz inter-chip wireless interconnection system [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 2015111.
- [8] ARLELID M, WERNERSSON L E, EGARD M, et al. 60 GHz ultra-wideband impulse radio transmitter[J]. IEEE International Conference on Ultra-Wideband, 2009: 185-188.
- [9] ZWICK T, BEUKEMA T J, NAM H. Wideband channel sounder with measurements and model for the 60 GHz indoor radio channel [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(4): 1266-1277.
- [10] 彭江涛, 李学华. 60 GHz 芯片间无线互连系统中的 Rake 接收性能[J]. 电讯技术, 2014, 54(10): 1424-1429.
PENG J T, LI X H. Performance of Rake receiver in 60 GHz inter chip wireless interconnect system [J]. Telecommunications Engineering, 2014, 54(10): 1424-1429.
- [11] 付炜. 短距离无线通讯中传播特性理论研究及相关关键技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
FU W. Study of radio wave propagation and key technologies in short-range wireless communications[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [12] 张新跃, 陶小峰, 张平, 等. 一种适用于超宽带系统的低复杂度 RAKE 接收机[J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(3): 93-95.
ZHANG X Y, TAO X F, ZHANG P, et al. A low complexity Rake receiver for ultra-wideband communication system [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 28(3): 93-95.

[作者简介]



陈现(1991-),男,北京信息科技大学信息与通信工程学院硕士生,主要研究方向为射频通信及高速电路传输。



李学华(1977-),女,博士,北京信息科技大学信息与通信工程学院副教授、副院长,主要研究方向为无线通信物理层关键技术。